

公B02

# 方向感度暗黒物質探査に向けた光学的異方性シンチレータの探索と実証

2017年5月22日

黒澤俊介(東北大NICHe & 山形大理)

関谷洋之(東大ICRR)、山路晃広(東北大 金研)ほか

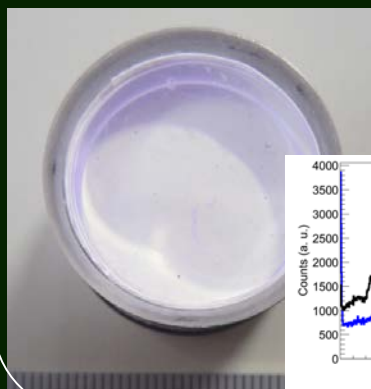
## 目次

- シンチで方向感度
- 結晶育成
- 光学特性評価

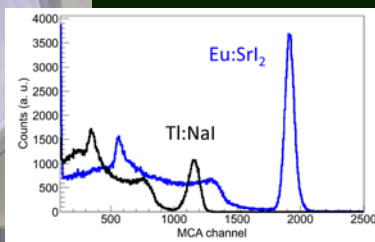


# 取り扱っている材料・形態

## ハロゲン化物シンチレータ



$\text{LaBr}_3$ ,  $\text{SrI}_2$



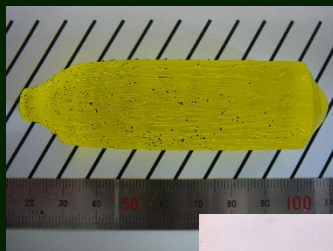
## 透明セラミックス



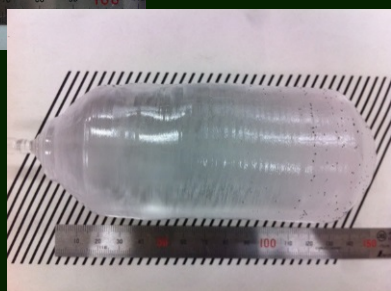
## 粉体



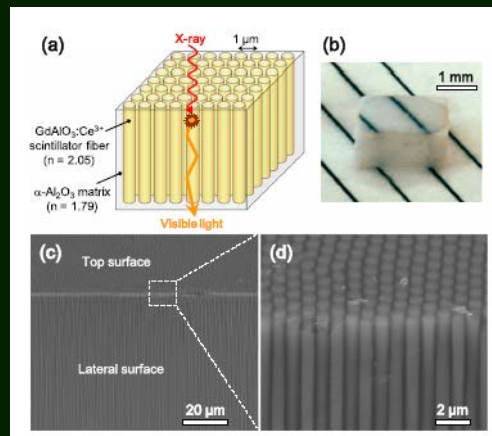
## 酸化物シンチレータ



GAGG,  
La-GPS  
ファイバー型

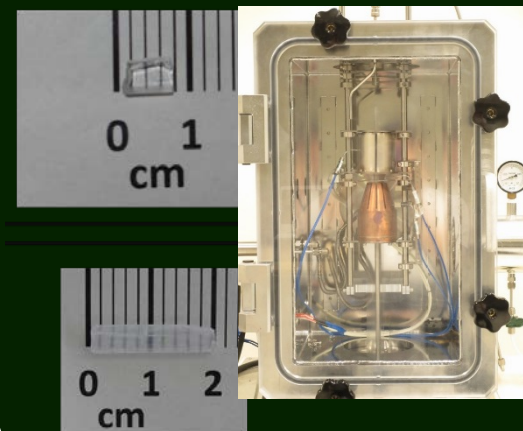


## 共晶体



Ohashi + JECS 34(2014)3849

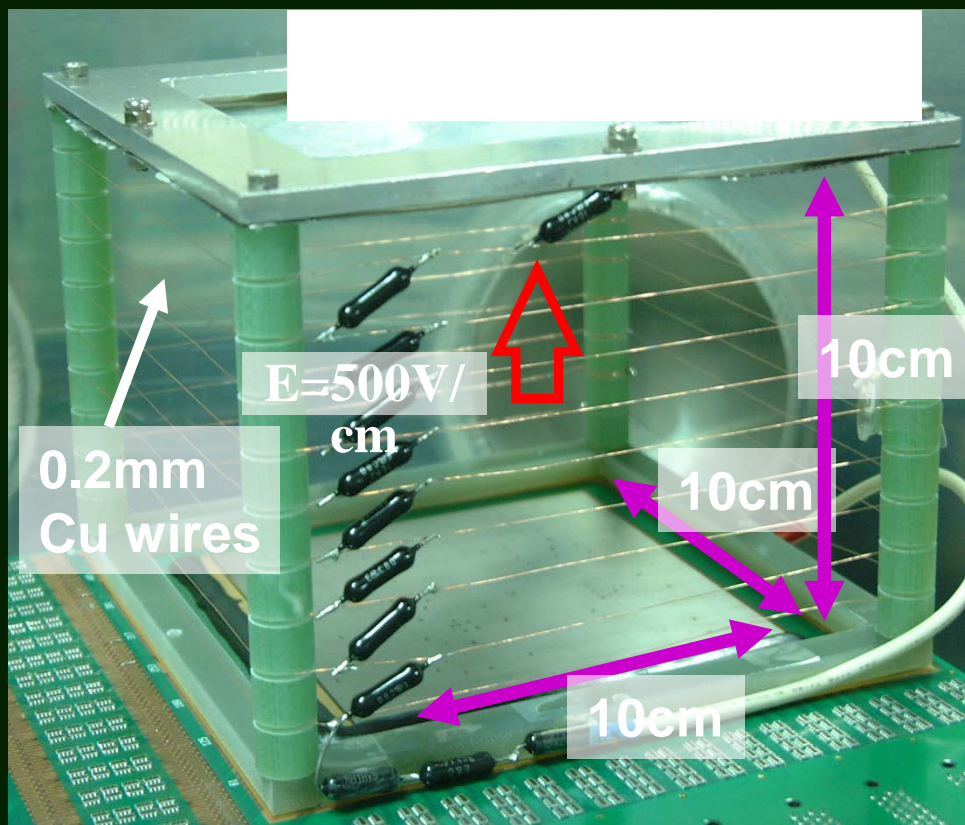
## 有機物



# 暗黒物質：方向感度を有する検出器

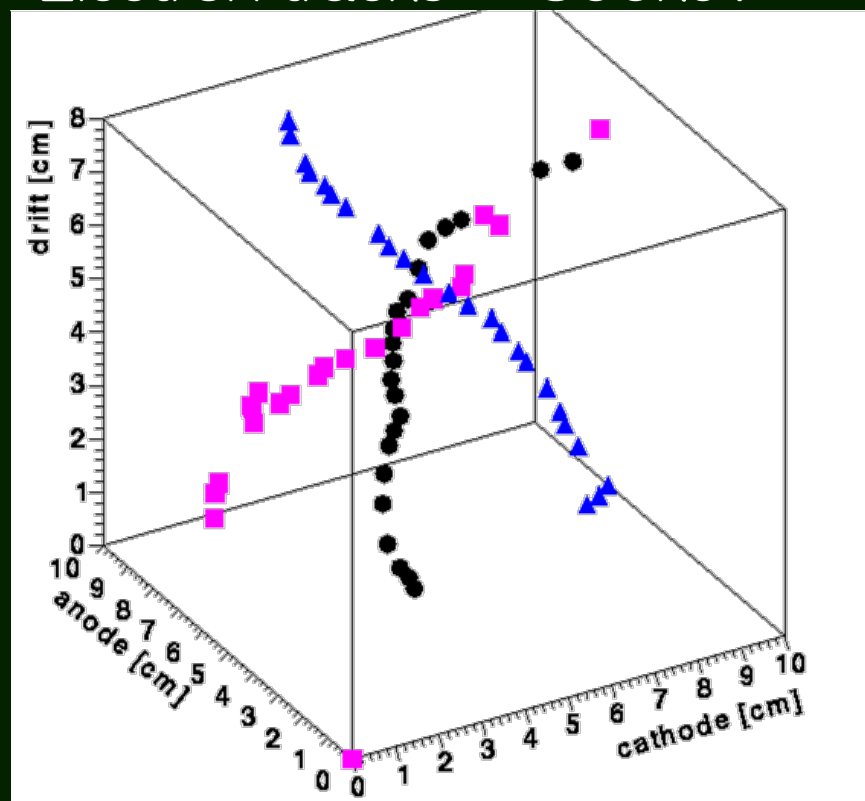
- ガス検出器 (ただし、感度が低い)
- 原子核乾板 (ただし、時間分解能がない)

$10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$  detection volume



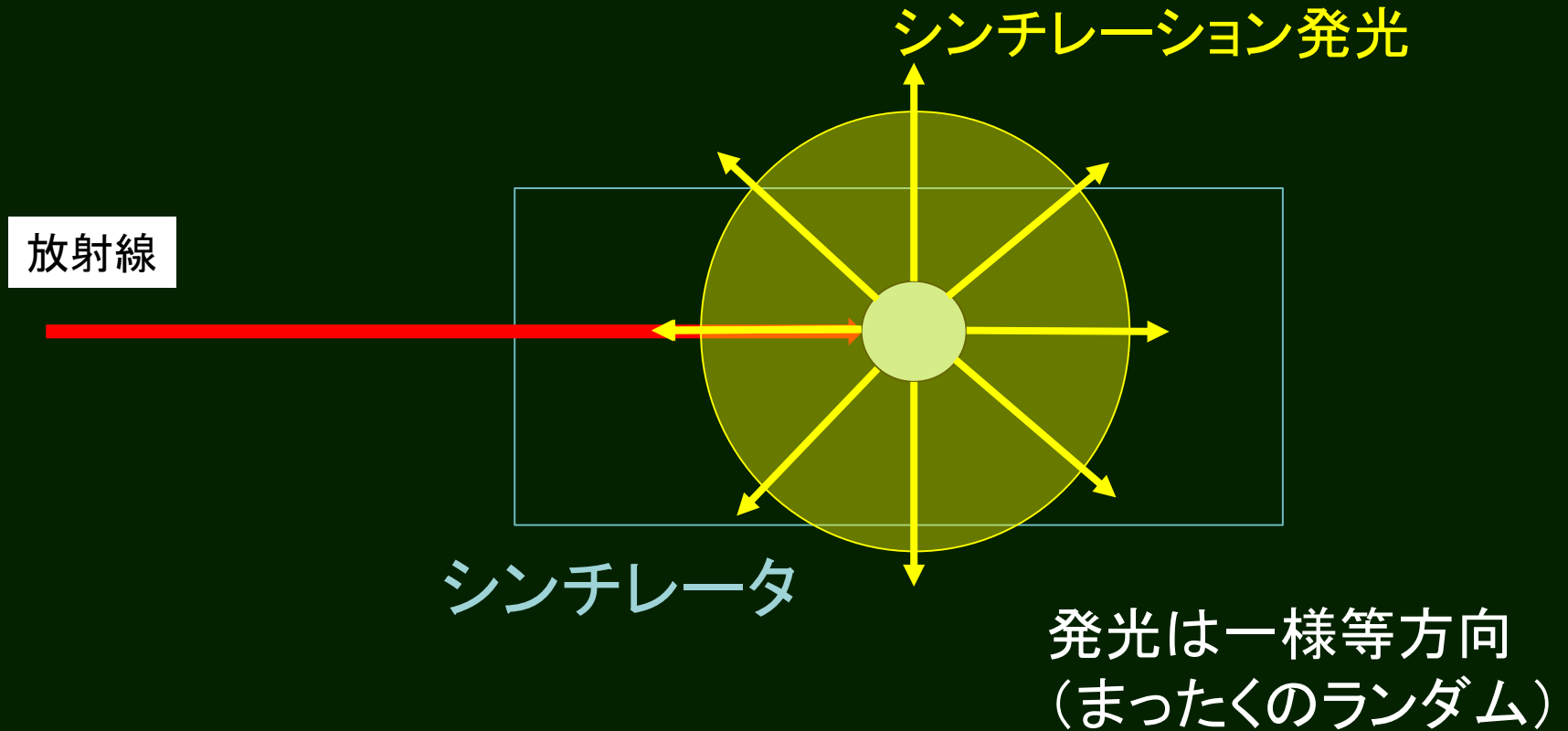
Kobe Univ.

Electron tracks  $\sim 500 \text{keV}$



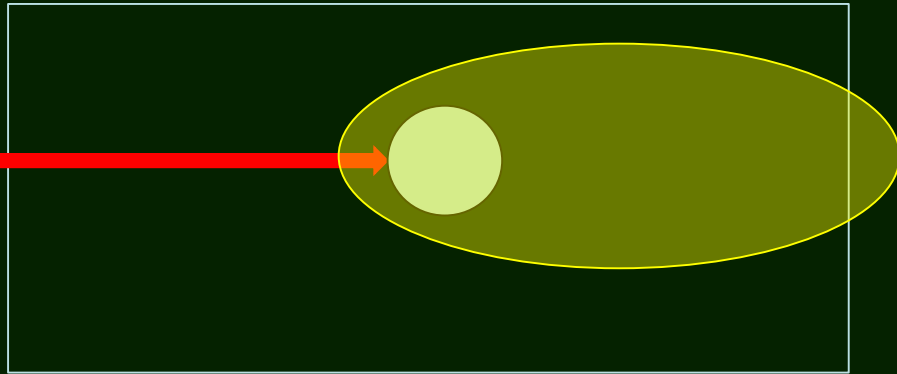
Ar 90%+C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 10% 1atm

# いままでの常識



# いままでの(非)常識

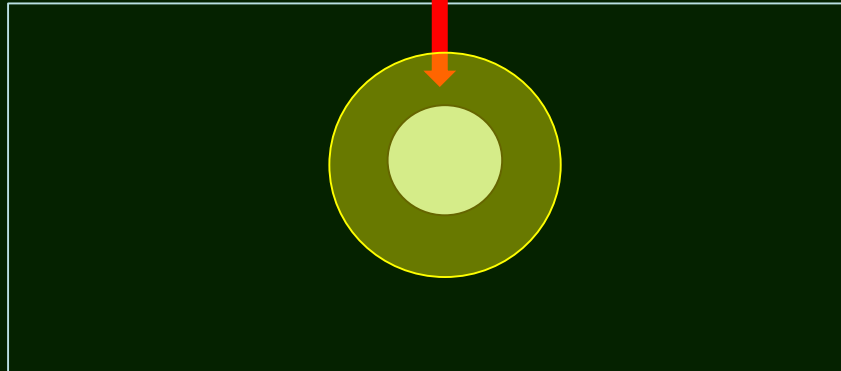
放射線



シンチレータ

発光に方向性あり？

放射線



シンチレータ

入射方向で発光の差あり？

# DAMA's report : 異方性結晶の可能性

Eur. Phys. J. C (2013) 73:2276  
DOI 10.1140/epjc/s10052-013-2276-2

THE EUROPEAN  
PHYSICAL JOURNAL C

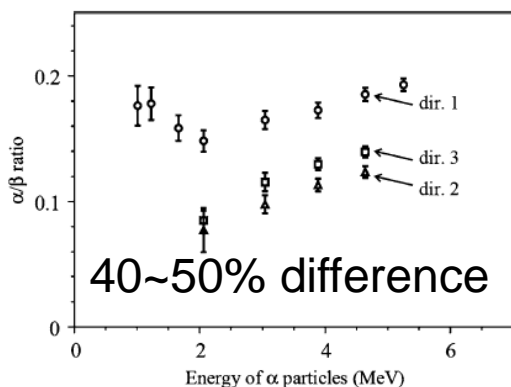
Regular Article - Experimental Physics

## On the potentiality of the $\text{ZnWO}_4$ anisotropic detectors to measure the directionality of Dark Matter

F. Cappella<sup>1</sup>, R. Bernabei<sup>2,3,a</sup>, P. Belli<sup>3</sup>, V. Caracciolo<sup>4</sup>, R. Cerulli<sup>4</sup>, F.A. Danevich<sup>5</sup>, A. d'Angelo<sup>1,6</sup>, A. Di Marco<sup>2,3</sup>, A. Incicchitti<sup>6</sup>, D.V. Poda<sup>5</sup>, V.I. Tretyak<sup>5</sup>

Directional response  
with MeV alpha particles

“Estimated” quenching factor @ 5keV



**Fig. 3** Dependence of the  $\alpha/\beta$  ratio on energy of  $\alpha$  particles measured with  $\text{ZnWO}_4$  scintillator. The crystal was irradiated in the directions perpendicular to (010), (001) and (100) crystal planes (directions 1, 2 and 3, respectively). The anisotropic behaviour of the crystal is evident [99]

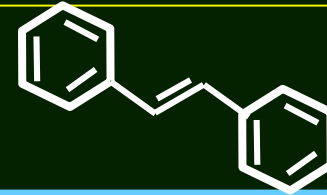
**Table 2** Quenching factors for O, Zn and W ions with energy 5 keV for different directions in  $\text{ZnWO}_4$  crystal. Systematic uncertainties are estimated on the level of 20 % using data of [90]

Ion	~30% difference		
	dir. 1	dir. 2	dir. 3
O	0.235	0.159	0.176
Zn	0.084	0.054	0.060
W	0.058	0.037	0.041

# スチルベン結晶(有機物結晶)の場合

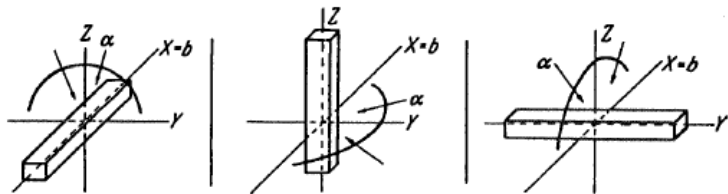
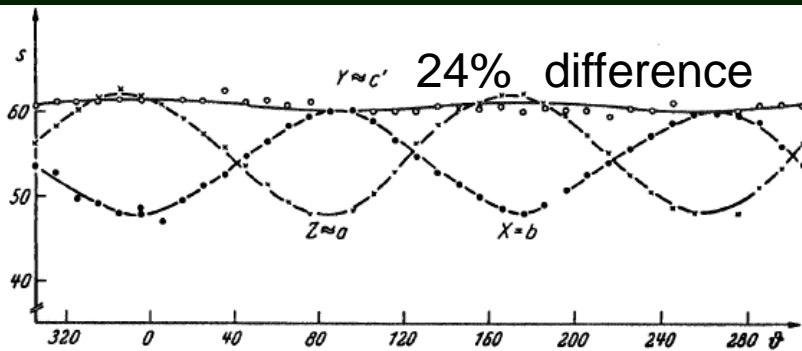
スチルベン:  $C_6H_5CH=CHC_6H_5$

例えば



- P.H. Heckmann et al., Z. Phys. 162 (1961) 122

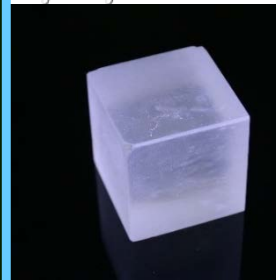
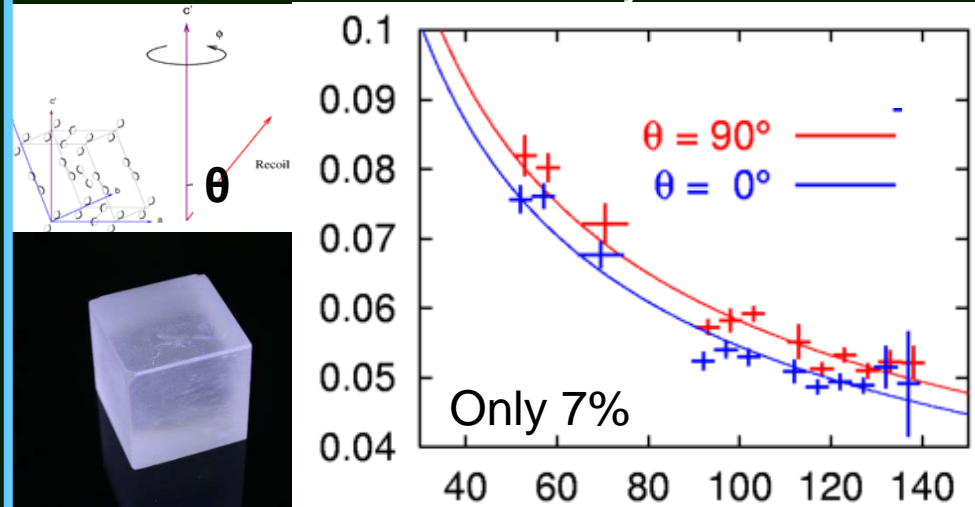
アルファ線で方向依存性を確認



- HS et al., Physics Letters B 571 (2003) 132

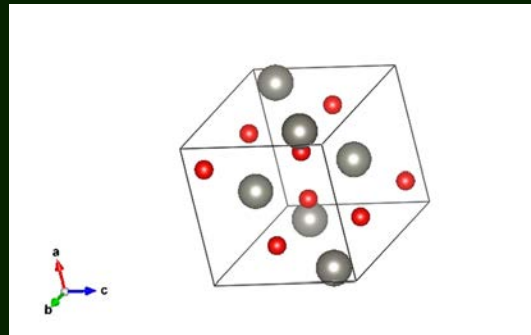
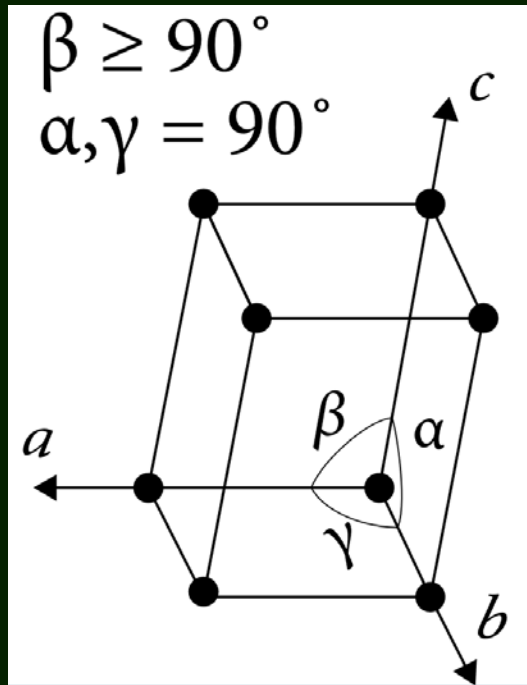
quenching factor@40keV の測定

only 7 % difference



# ZnWO<sub>4</sub>の結晶構造

Monoclinic crystal system (単斜晶系)



空間群 P 2/c

$a$ [Å]	$b$ [Å]	$c$ [Å]
4.69060	5.71820	4.92690
$\alpha$ [度]	$\beta$ [度]	$\gamma$ [度]
90.0000	90.6210	90.0000

立方晶に近い



育成しやすそう

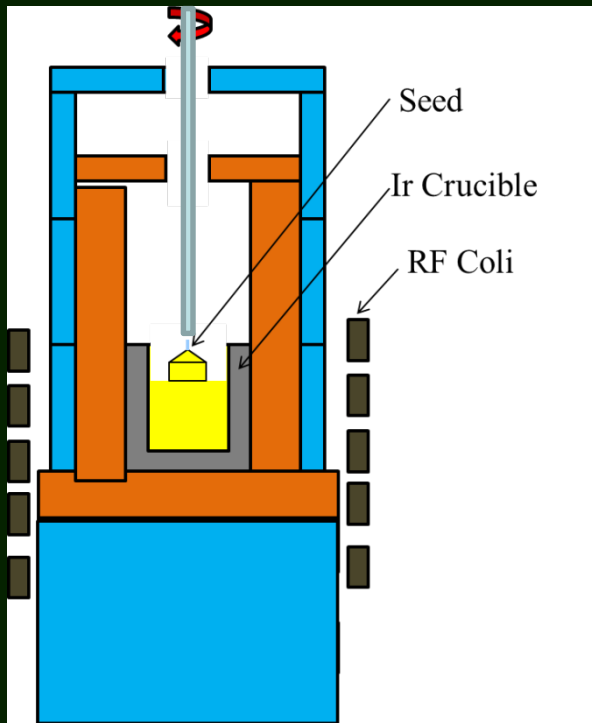


# 大型化の取り組み

本研究の目的： 結晶サイズが小さく、  
よくわからないので大型化して特性を見る

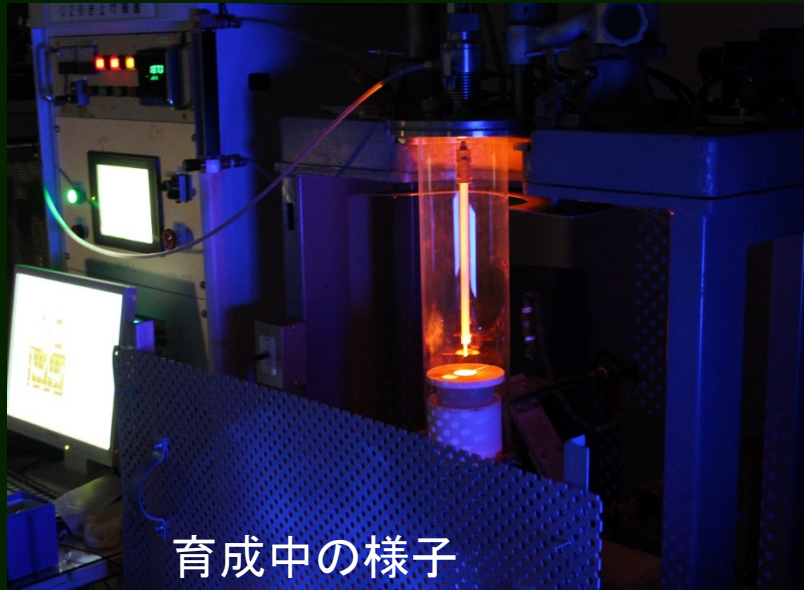


チョクラスキー法(引き揚げ)による結晶育成



出発原料	ZnO, WO <sub>3</sub> (純度99.99%)
引き上げ速度	0.5mm/h
種結晶の軸	C軸
雰囲気	Ar+O <sub>2</sub> (2%)
回転数	12rpm

# 大型化の取り組み: 育成の様子



育成中の様子



拡大図

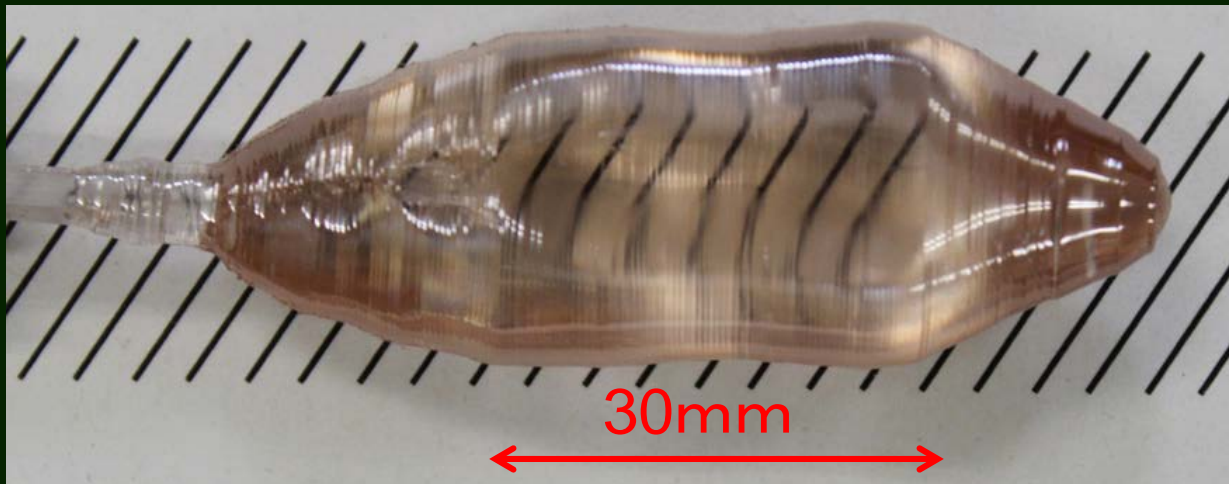


UVランプ照射時の様子

**育成に成功**

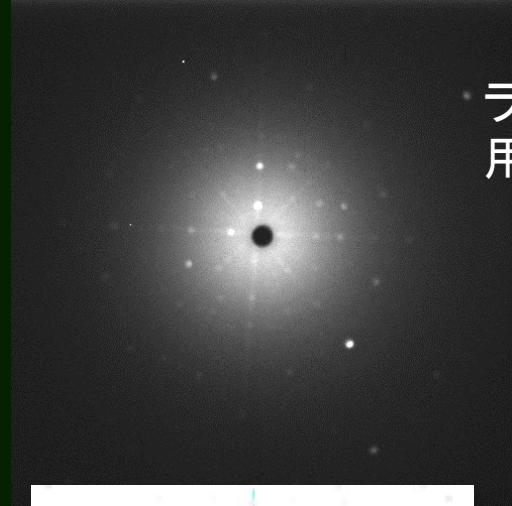
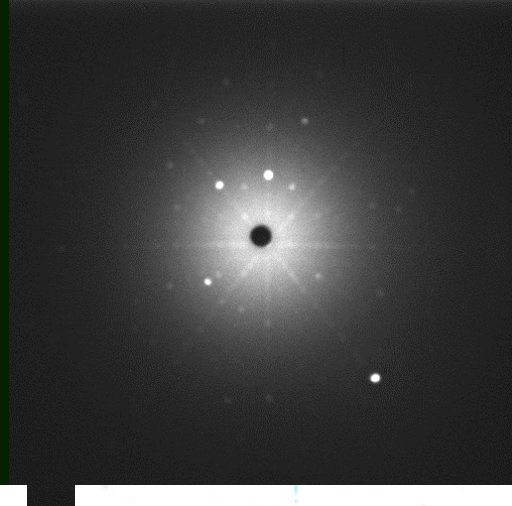
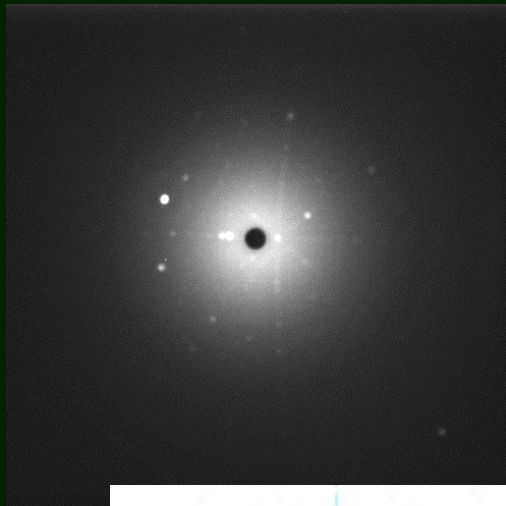
やや茶色かった

酸素もしくは  
電子欠損  
(おそらく熱処理  
で透明化されると  
考えている)

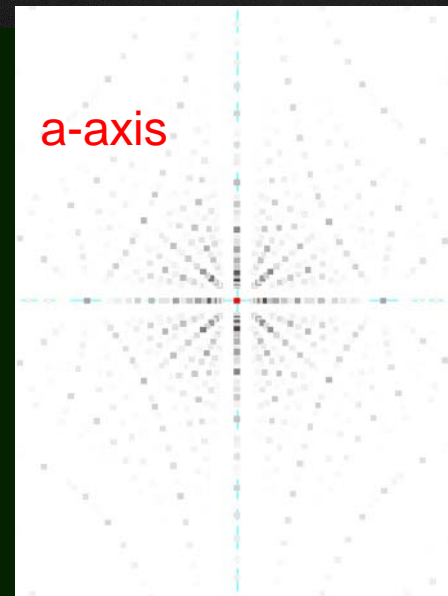
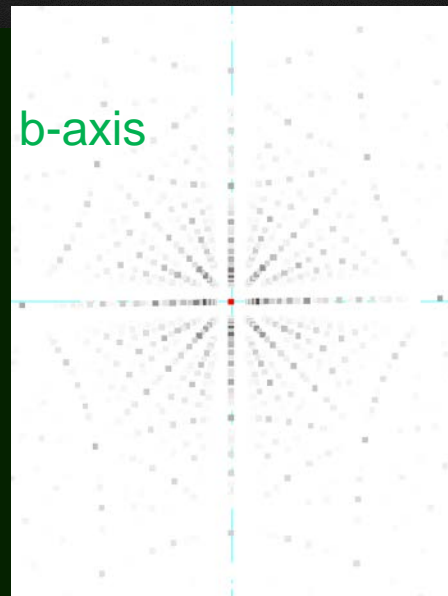
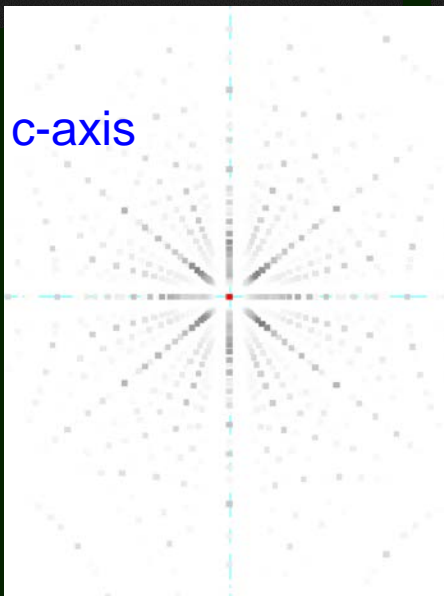


30mm

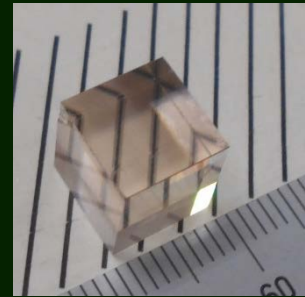
# 結晶の方位などの確認



ラウエカメラを用いて方位出し



9 mm角に切断、研磨



# 更なる確認

ラウエカメラの結果では、ラウエ斑点がぼやけていたので、高出力・高精度複数軸X線回折計(ATX)で面の再確認

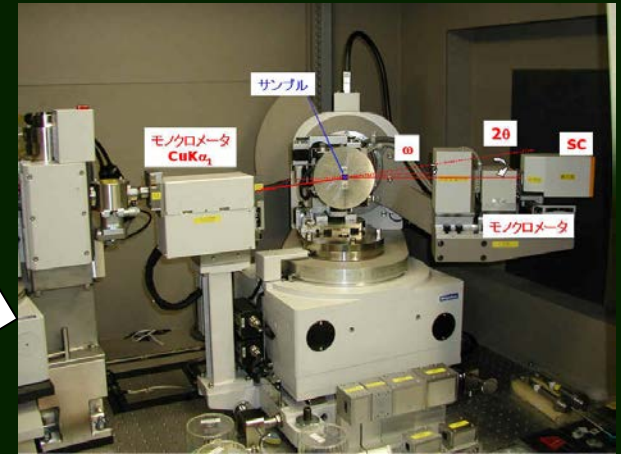
決まった面(例えば、010面)  
固有の $\theta$ がある

CCDカメラ

X線発生

$\theta$

結晶格子面



<http://www.msl.titech.ac.jp/~hosono/facilities/ATX.html>

# 更なる確認

ラウエカメラの結果では、ラウエ斑点がぼやけていたので、高出力・高精度複数軸X線回折計(ATX)で面の再確認

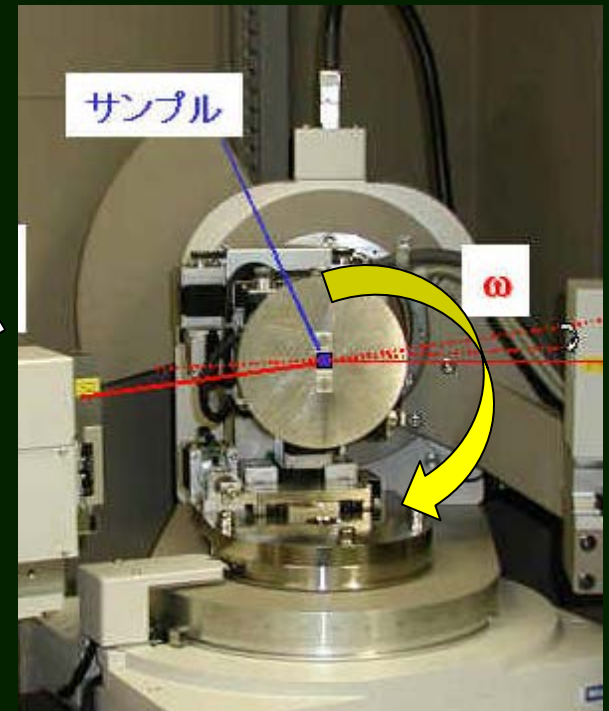
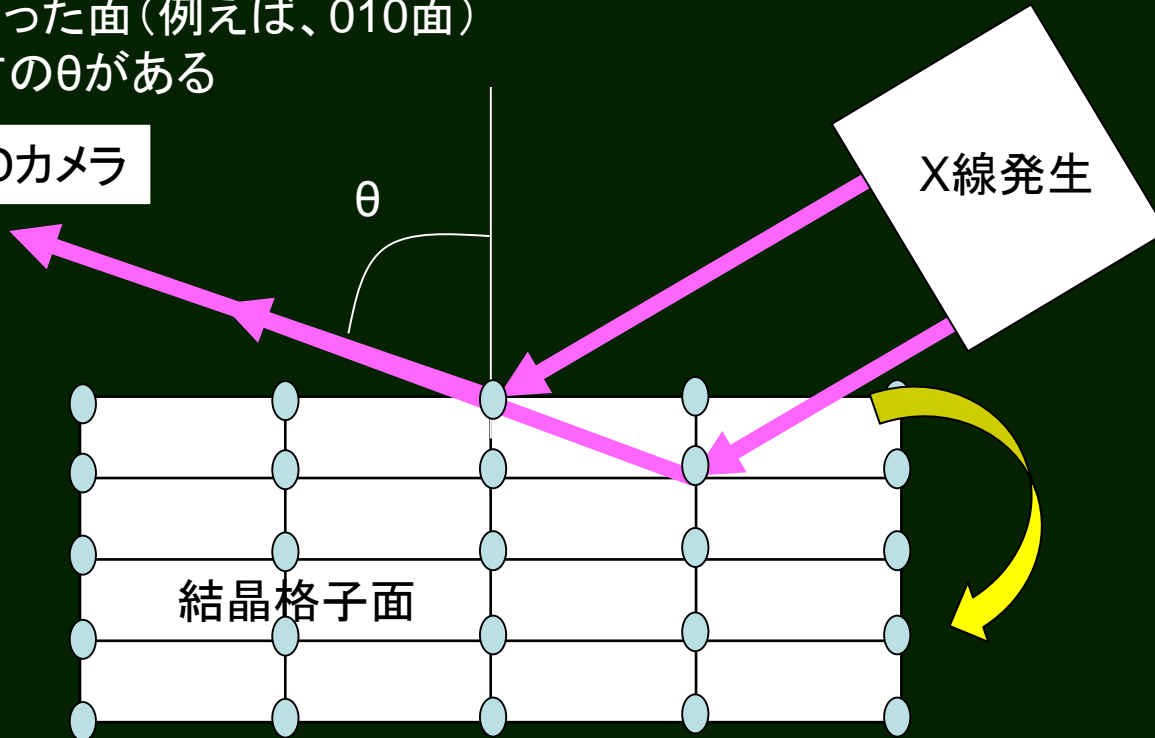
決まった面(例えば、010面)  
固有の $\theta$ がある

CCDカメラ

X線発生

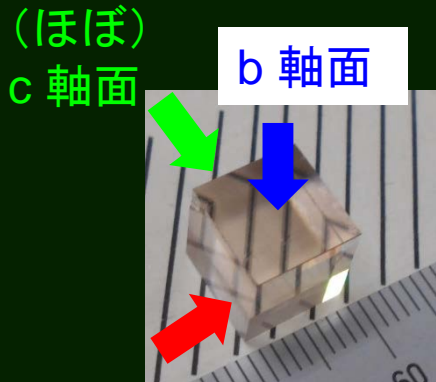
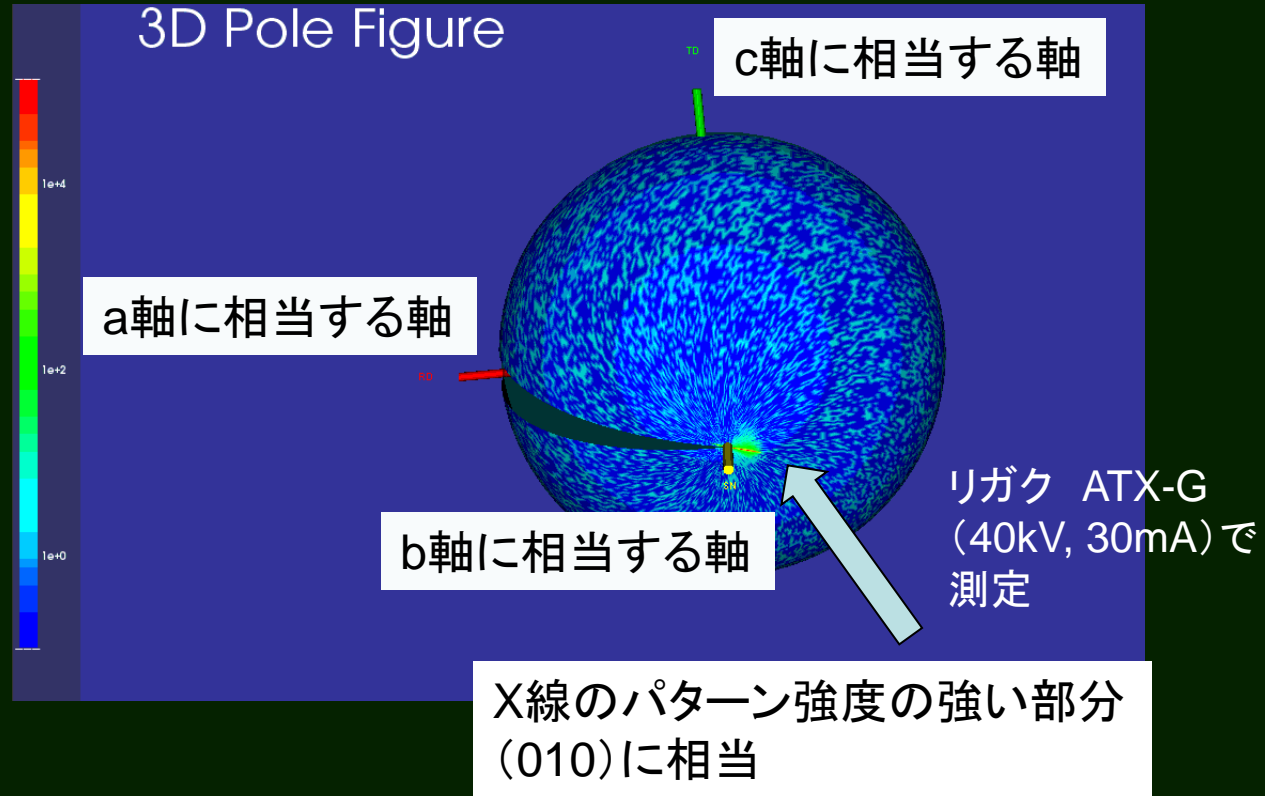
$\theta$

結晶格子面



結晶を少し回転( $\omega$ )させて、例えば010面(b軸面)からの反射がどの角度で強いかを見る  
反射が最強のところ正しい010面

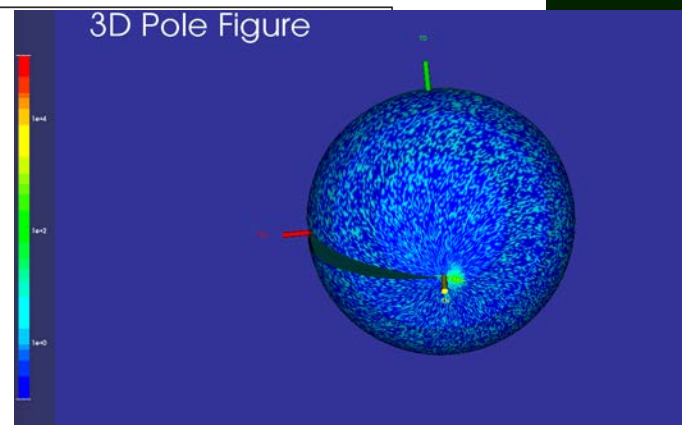
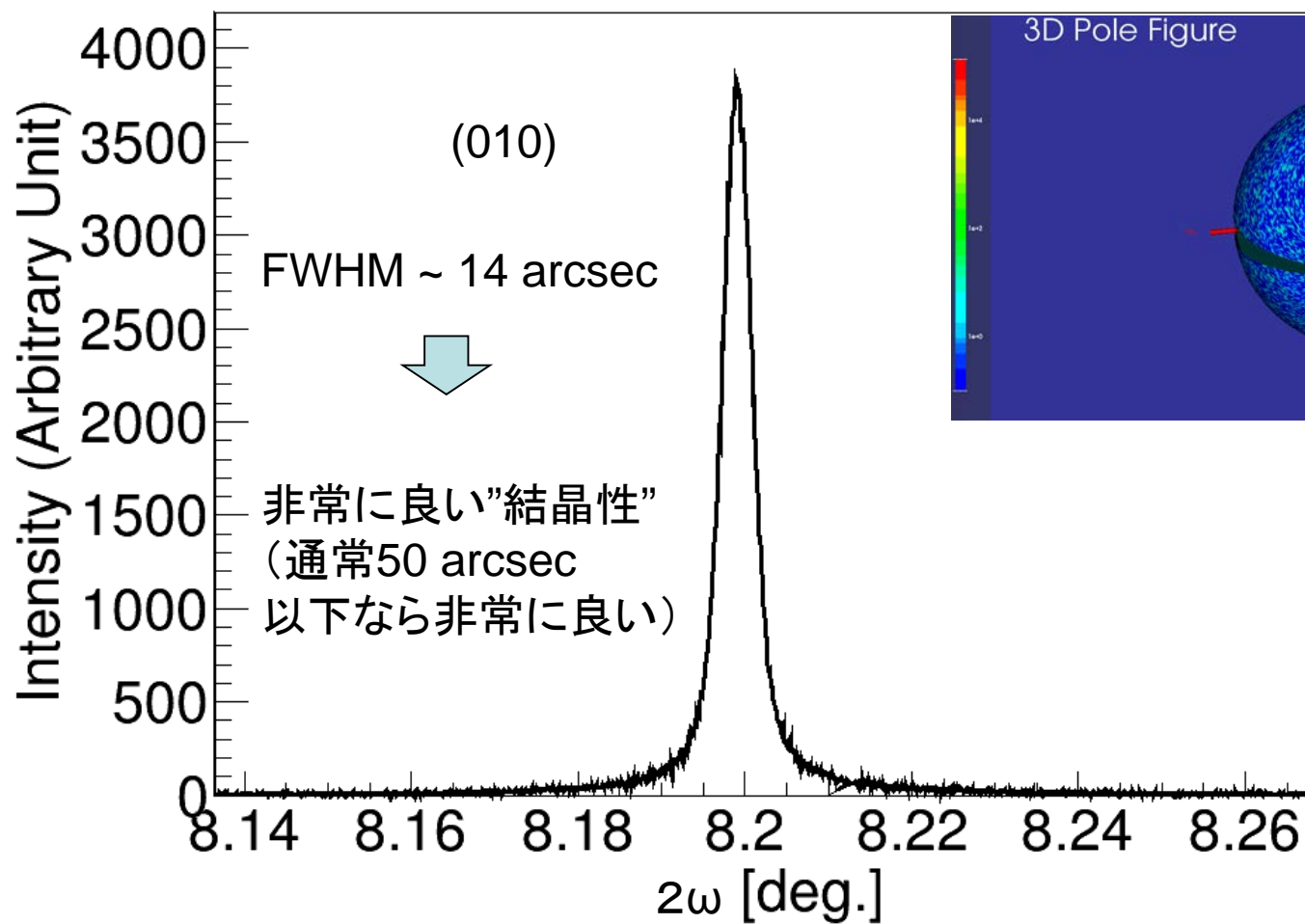
# 更なる確認



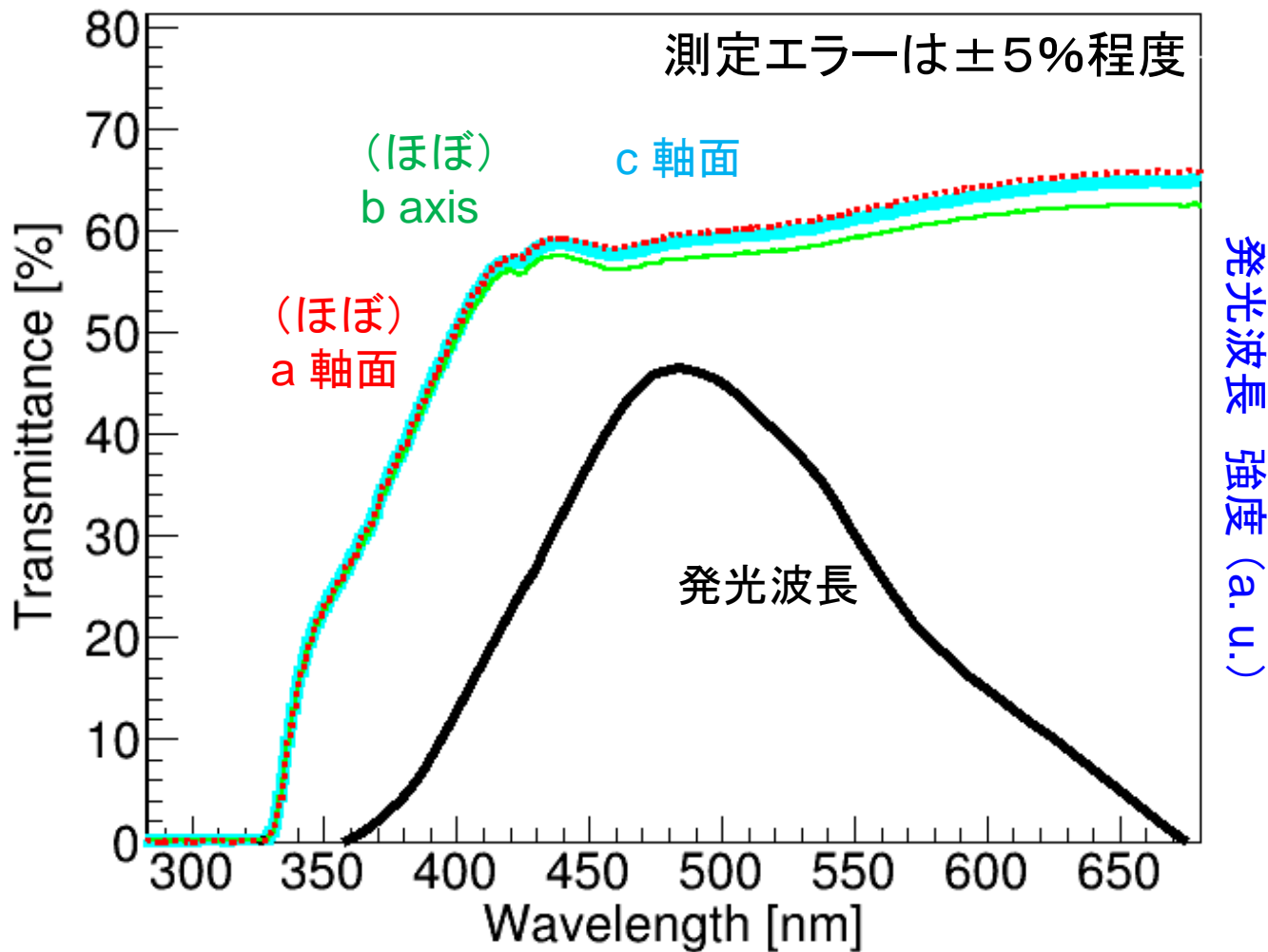
(ほぼ)  
a 軸面

ラウエカメラの結果ではぼやけていたので、  
高出力・高精度複数軸X線回折計(ATX)で面の再確認  
へき開面はb軸

# ロッキングカーブ



# 方位ごとの透過率の差

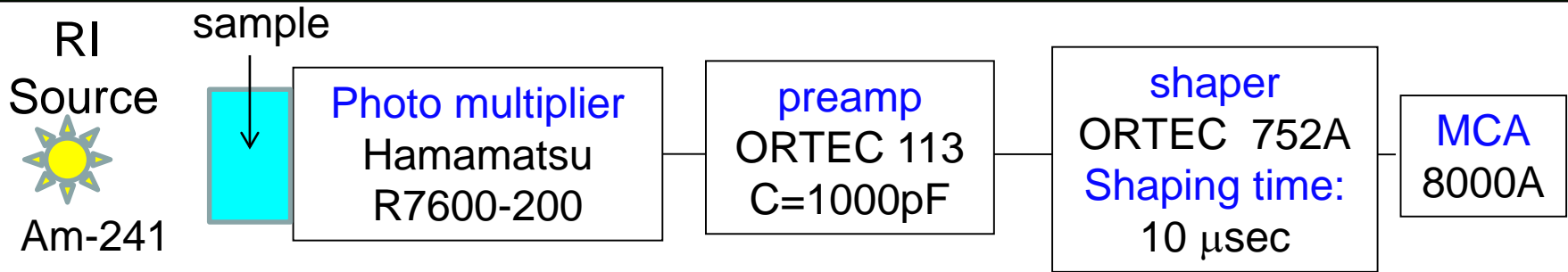
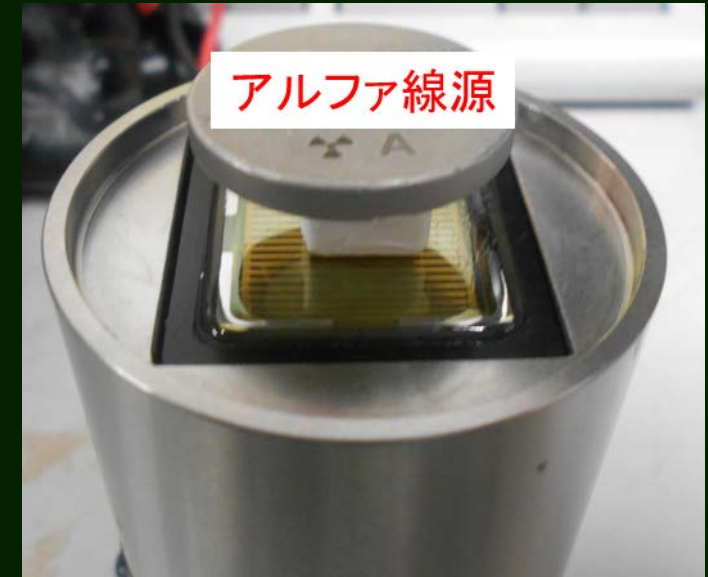
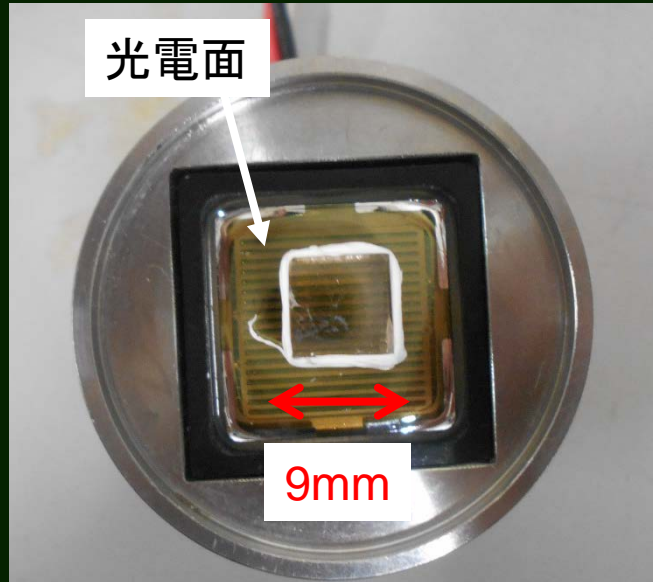
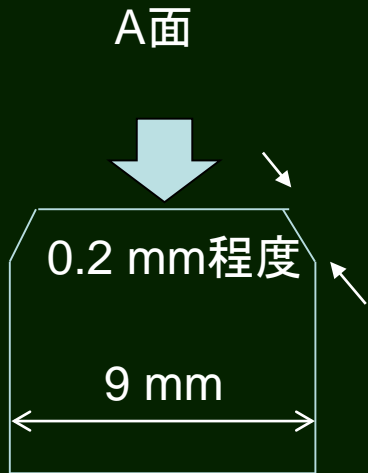


透過率測定用  
分光器:  
V-530,  
JASCO

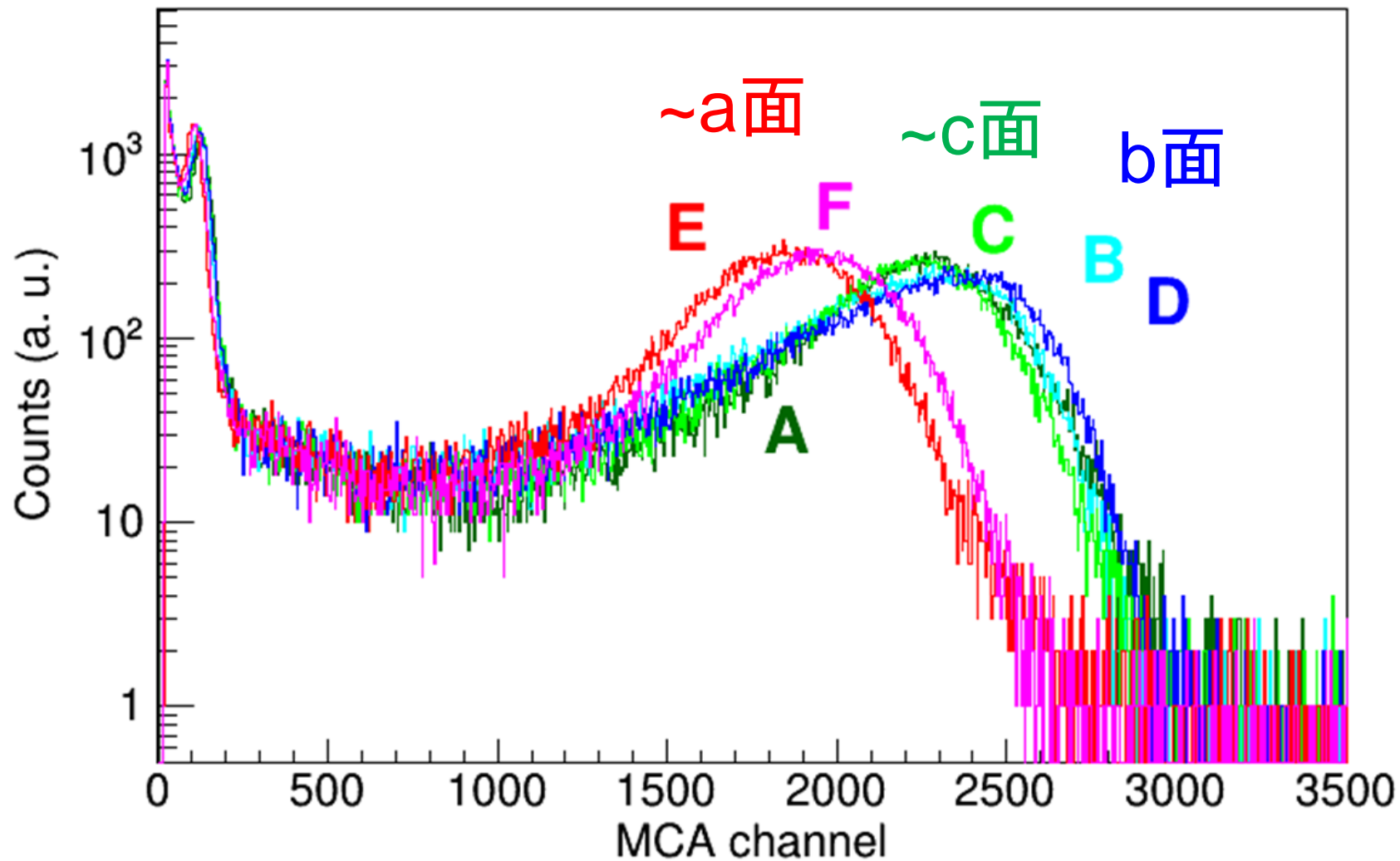
ほとんど方位  
による差は  
なかった。



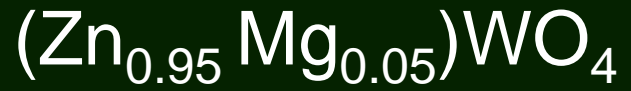
# 方位ごとの発光量の測定方法



# 発光量の結果



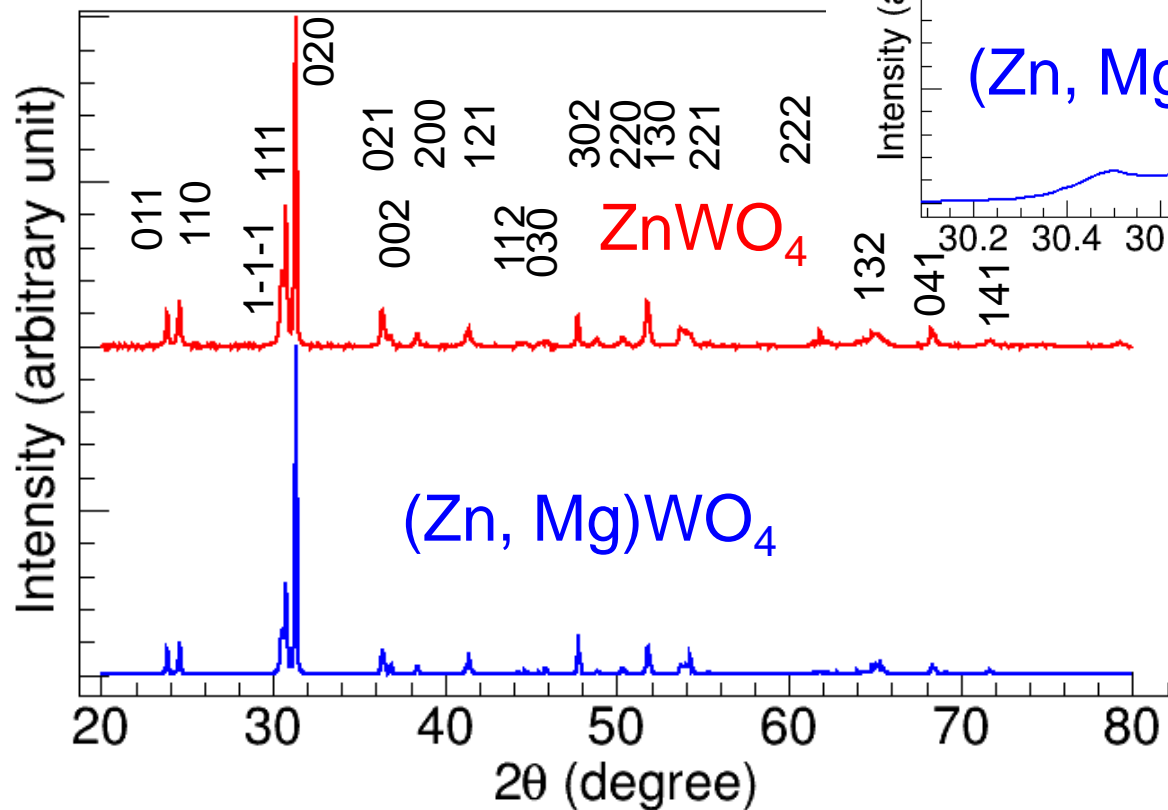
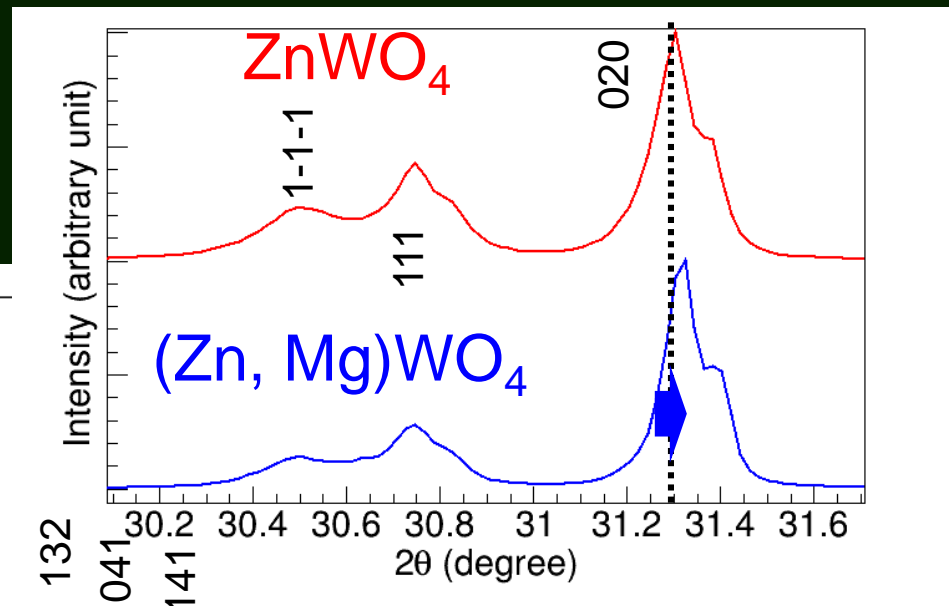
# Znの一部をMgで置換



# 粉末X線回折

## (目的の結晶構造かどうかの確認)

使用機器: BURKER D8 DISCOVER  
X線発生ターゲット: Cu-K $\alpha$   
加速電圧 40 kV, 電流: 40 mA



- ・目的の相を確認  
(単斜晶系)
- ・Mg添加でピークがわずかにシフト  
(右シフト:  
小さいイオン添加をサポート)

## まとめ＋考察

- (Zn, Mg)WO<sub>4</sub>を育成評価
  - 異方性を確認
  - ただし、異方性はMg添加で小さくなった。
  - 発光量 ZnWO<sub>4</sub>に比べて25%程度低下
- もっとb軸を伸ばせばより異方性が出る可能性があるが。。。

イオン半径: Mg<sup>2+</sup> 0.57 Å  
Zn<sup>2+</sup> 0.60 Å  
Cd<sup>2+</sup> 0.95 Å ただし、あぶない&バックグラウンド  
(いずれも4配位)

同じ単斜晶でKGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>も異方性有力候補、ただしKがバックグラウンド源  
a = 10.652 (4), b = 10.374 (6), c = 7.582 (2) Å

➡ ZnWO<sub>4</sub>を第一候補として大型化+中性子実験に今後取り組む

# 今後の予定

	H29 前半	H29 後半	H30 前半	H30 後半
Mgシリーズの 育成	→			
これまでと同じ 評価	→			
中性子線源に よる評価	→			
中性子ビーム を用いた評価	→			
その他の結晶 での評価	→			
結晶の大型化	→			
神岡での実験	→			